

## Gondolatok az alagúttervezés koncepciójáról

Léber Tímea

Mott MacDonald Ltd, timea.leber@mottmac.com

Lázár Márta

BÁTKONTROLL Kft., marta.lazar@batkontroll.hu

Kovács László

Kőmérő Kft. komero@upcmail.hu

Vásárhelyi Balázs

Vásárhelyi és Tsa. Kft., vasarhelyib@gmail.com

**ÖSSZEFOGLALÁS:** Jelen cikk gondolatébresztés céljából készült, így sok esetben tartalmaz (tartalmazhat) ki nem dolgozott, még kérdéses részeket. A cikk három fő téma köré csoportosítható, melyeket az adott témakörben összegyűjtött szakirodalom alapján állítottunk össze: 1) Mi is az a geotechnikai modellezés és ehhez hogyan kapcsolódik a mérnökgeológiai modell. Milyen bemenő adatokra van itt szükségünk. 2) Alagutak tervezése esetén a geotechnikai ismeretek alapján milyen folyamat alapján járunk el; 3) Különböző kőzettestek esetén milyen numerikus modell megválasztása célszerű. A felvetett kérdések reményeink szerint indikátorként hatnak a hazai szakmai élet fejlődésére.

*Kulcsszavak:* geotechnikai és mérnökgeológiai háromszög, numerikus módszerek, alagúttervezés,

### 1 BEVEZETÉS

A geotechnika, mint tudományág a kőzetek (értve alatta a talajokat is), illetve az azokban kialakított mérnöki létesítmények viselkedését elemzi. A valós kőzet azonban – természetéből adódóan – sokkal komplexebb, mint a mérnöki gyakorlatban alkalmazott anyagok általában. Ebből következően a tervezés alatt álló létesítmény (mely lehet mind a kőzeten, mind abban) és a kőzetkörnyezet valós viselkedésének előrejelzése, tehát a megfelelő modellezés a mérnökök számára nagy nehézséget okoz. Erre vezethető vissza a geotechnikai problémák többsége is. Jelen cikkben az alagutak tervezésének menetét, annak filozófiáját mutatjuk be, a geotechnikai ismereteket szem előtt tartva.

A geotechnikai tervezés során négy jól elkülöníthető, egymással azonban összefüggő szempontrendszer definiálható:

- kőzet/talajrétegződés – a talajvízviszonyok figyelembevételével;
- a kőzet/talaj viselkedése – mérések, megfigyelések;
- a kőzet/talaj várható viselkedésének meghatározása – megfelelő modellek alkalmazásával;
- empirikus (tapasztalati) eljárások – döntés, értékelés a jól megválasztott tapasztalatok alapján.

A *rétegszelvény* a kutatás legfontosabb eredménye, amely szemlélteti a geológiai folyamatok eredményét, az emberi beavatkozás hatását, és tartalmazza a talajvízviszonyokat is.

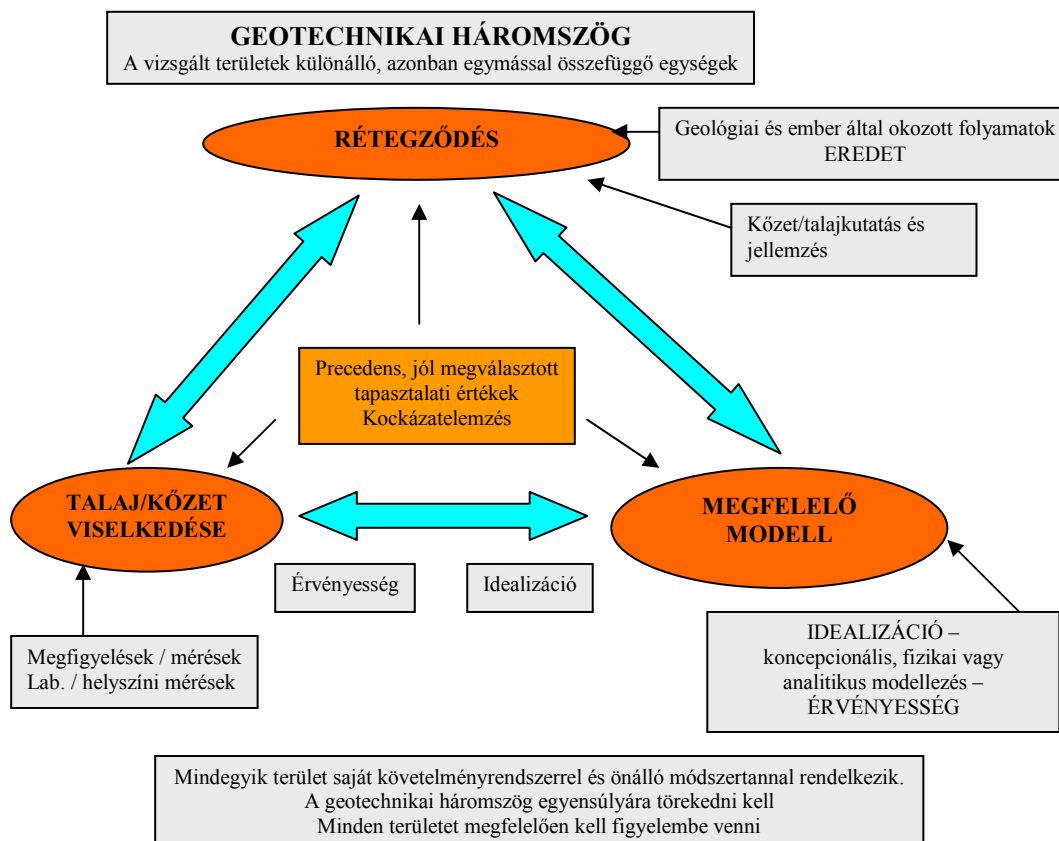
A *kőzet/talaj viselkedésének* megfigyelése, mérése magába foglalja a laboratóriumi és helyszíni mérések eredményét.

A kőzetösszlet *megfelelő modellezése* egy olyan idealizációs folyamat, amely a valós világ ismereteit gyűjti össze, egyszerűsíti le, majd rendezzi egy olyan modellbe, amely alkalmas a vizsgált probléma elemzésére, és lehetőséget ad a kapott eredmények felülvizsgálatára. A modellezési folyamat az eredmények érvényesítésével, ellenőrzésével zárul, amely akár egy iterációs folyamattá is alakulhat.

Egy olyan komplex és változó összetételű anyag esetében, mint a kőzet, a tapasztalati értékek és eljárások alkalmazása elkerülhetetlen. A mérnökök számos tervezési és kivitelezési eljárásban tapasztalati értékek alkalmazására kényszerülnek. A modellezéssel kapcsolatosan lényeges hangsúlyoznunk ezen tapasztalati értékek, valamint az egyszerűsítések helyességének fontosságát. Az 1. ábrán bemutatott geotechnikai háromszög nagy segítséget nyújthat ebben, ugyanis tiszta képet ad a geotechnikai gyakorlat három alapterületéről és a közöttük lévő kapcsolatról. (Az ábra szerkesztésének személye és pontos ideje a nemzetközi szakirodalom alapján nem megadható. Mi Morgenstern, 2000, Knull, 2003 és Burlan, 2007-es cikkeit vettük ebben a fejezetben alapul).

A diagramban az első három fent említett szempont alkotja a háromszög három csúcsát. A diagram egyszerűen alakítható a geotechnikai tervezési követelmények sémájára. Mindegyik jelzett terület

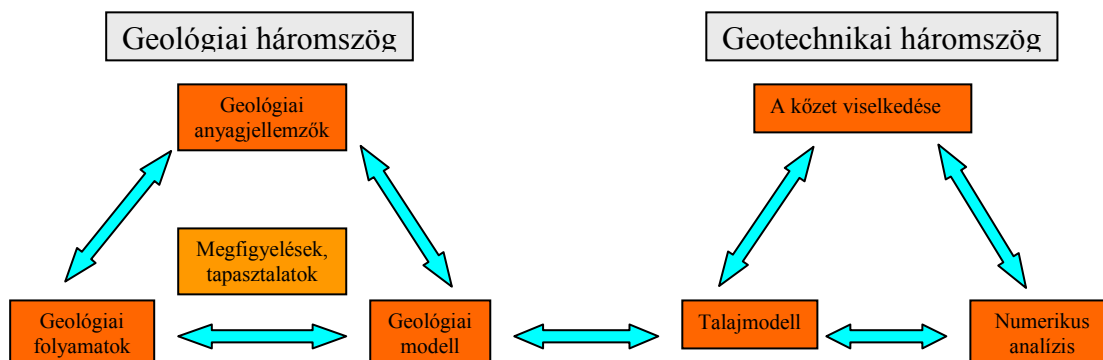
rendelkezik saját módszertannal, illetve követelményrendszerrel, amelyeknek minden körülmények között teljesülniük kell, valamint törekedni kell ezen egységek egyensúlyára is. A geológiai modell felépítéséhez szükséges adatok gyűjtése, értelmezése és alkalmazása a geológiai-mérnöki funkció séma közepén helyezkedik el. A geotechnikai modellek előkészítésének az eredményesség érdekében követnie kell a geotechnikai háromszög felépítését.



1. ábra. A geotechnikai háromszög és elemei

Egy, a geotechnikai háromszöghöz hasonló diagramba rendezhető az anyagjellemzők, a kőzet viselkedése és a modell egysége, amelyek a mérnökgeológiai háromszöget határozzák meg. A háromszög belsejében a helyesen megválasztott megfigyelési, tapasztalati értékek, benyomások helyezkednek el.

A mérnökgeológiai háromszög általánosabb területeket fed le, mint a geotechnikai háromszög. A két diagram közti kapcsolatot a 2. ábra mutatja (Knill 2003 alapján).



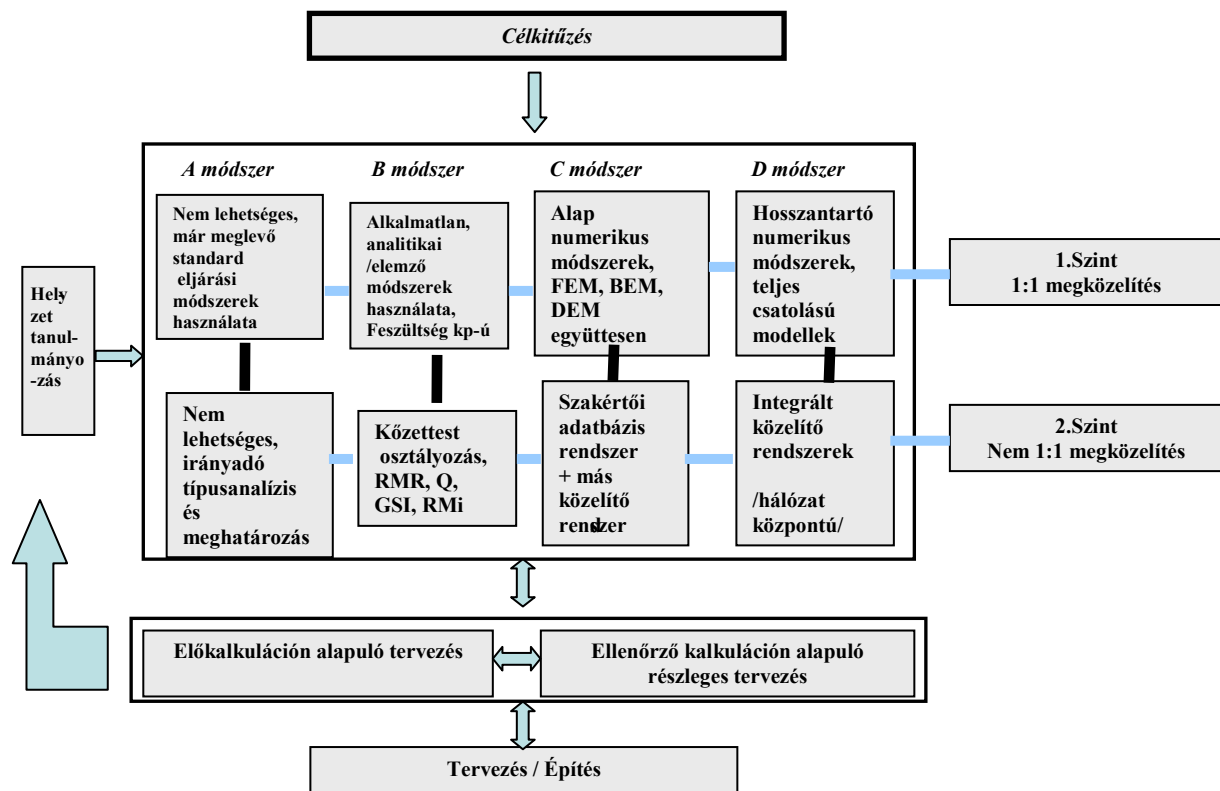
2. ábra. A mérnökgeológiai és geotechnikai háromszög közötti kapcsolat (Knill, 2003)

A mérnökgeológiai modell önmagában nem alkalmazható a mérnöki gyakorlatban, mert nem határozza meg egyértelműen a tervezéshez szükséges mérnöki feltételeket. Éppen ezért elengedhetetlenül szükséges, hogy a tervezési paramétereket egy újabb mérnöki elemzés részeként egy közetmodellbe építsük be. A közetmodellt azután hozzá kell igazítani a geotechnikai háromszög által meghatározott rendszerhez, amelyet aztán közvetlenül alkalmazhatunk egy matematikai vagy fizikai modell részeként, hogy a folyamat végén a mérnöki következtetéseket levonhassuk. A mérnökgeológiai modelltől a közetmodellen át, a geotechnikai modellig vezető folyamat során elkerülhetetlen az egyszerűsítések alkalmazása annak érdekében, hogy a kiválasztott matematikai vagy fizikai modell a vizsgált problémát pontosan leírja. Az egyik modelltől a másikba történő átalakítás során feltétlenül meg kell bizonyosodnunk arról, hogy az aktuális feltételek olyan pontosan lefedik a végső analízist, amennyire csak lehetséges. Nagyon fontos megbizonyosodnunk arról, hogy a különálló egységek követelményrendszere érvényesül, hogy azokat megfelelő egyensúllyal vettük figyelembe és a különböző egységek közti kapcsolati folyamatok megfelelőek-e.

## 2 A MODELLEZÉS FOLYAMATÁBRÁJA

Számos folyamatábra létezik az alagutak modellezéséhez kapcsolódóan (legismertebbek: Hoek és Brown ET 1977, Pahl és Beitz 1984, Bieniawski 1989 és 1993, Hudson 1993, Li et al. 1998). Jelen fejezetnél Hudson és Feng 2006-os publikációját vettük alapul, az ő általuk felvázolt modellezési folyamatot mutatjuk itt be.

Az általuk megalkotott, kezdeti modellezés közelítő eljárásán alapuló folyamatábráját az 3. ábra mutatja. A modellezés folyamatábrájának célja, hogy összefoglalja a 8 kezdeti modellezési kategóriát a projekt céljával, helyszíni vizsgálattal, tanulmányozásával, megnevezésével együtt. A négy oszlop (A-tól D-ig) bonyolultsági fok alapján 4 szintet határoz meg, balról jobbra haladva az egyszerűbbtől a bonyolult felé. Az első három kategória (A-C) a közetben való tervezés során széles körben elterjedt módszert mutatja. A negyedik, a D kategória, kiterjedt összehangolt modellezési módszer, amely jelenleg kidolgozás alatt áll, jelentős nemzetközi kutatócsoportok foglalkoznak ezzel (pl. az ún. Decovalex kutatási program). A D kategória alsó sorában található integrált rendszer és internet alapú megközelítés jelenleg nem elég fejlett, de a kísérletek biztatóak.



3. ábra. A közetmechanikai modellezés folyamatábrája (Hudson és Feng, 2006 alapján)

A 3. ábrán található két sor a nyolc modellezési módszerrel, a modellezésben használt két fő utat képviseli. A felső sorban, az 1:1 arányú, első szintű megközelítés során a modellezés a geometria és operációs mechanizmus 1:1 alapúságára törekszik. Például, ha egy főtörési vonal található az alagútszisztéma közelében, akkor ez szükségszerűen a numerikus modell része lehet. Azonban az alsó sorban 2. szint, a „nem-1:1 megközelítés” során, a modellezési technikák nem veszik közvetlenül figyelembe a geometriát és a mechanizmust. Például egy hálózati rendszer technikában csomópontok alkalmazása szükséges, de a véges elemes közelítéssel ellentétben az adott csomópont nem utal közvetlenül egy helyre vagy egy fizikai változóra.

Manapság szükség van egy integrált megközelítésre, amely magában foglalja az elemzési módszerek párhuzamos és egymást követő alkalmazását, összehangolva a közettestben való tervezést a befogadó közet jellemzőinek figyelembevételével. Az integrált modellezésnek egy olyan folyamatsornak kell lennie, amely tartalmazza a megismerés kalibráció és módosítás és újra megismerés állomásait, hogy meghatározhassuk a közetközeg viselkedését. Az „alkalmazkodás (= adaptív)” fogalom megfelelő, mert arra utal, hogy a probléma megoldási folyamata alkalmas arra, hogy alkalmazkodjon a geológiai körülmények, a megközelítési módok, mechanikai paraméterek és modellek, valamint az analitikai módszereknek megváltozásához.

Ily módon az alkalmazkodó képesség nélkülözhetetlen követelmény annak érdekében, hogy képesek legyünk visszacsatoláson keresztül véghezvinni a 3. ábrán bemutatott modellezés, tervezés, kivitelezés, és az adatok további vizsgálatának folyamatait. Mindazonáltal a modellezés és a probléma megoldási eljárás egy rendszert alkot, tehát a modellezést úgy kell alakítani, hogy az elősegítse a rendszer megismerését, különös tekintettel a bemenő és kimenő adatok viszonyára, illetve az új vagy változó tényezők hatásának megismerésére.

Érdemes megjegyezni, hogy néhány megközelítés a folyamatára jobb oldalán, például a D módszer, jelenleg csak korlátozott mértékben elterjedt, de a közeljövőben fejlődés várható ebben az oszlopban is.

A kiterjedt numerikus modellek magukba foglalják az összhangban levő termo-hidro-mechanikai-kémiai (T-H-M-C) folyamatokat. A nem 1:1 megközelítések, integrált rendszerű – lehetőleg internet-alapú - közelítések különösen Kínában fejlődnek.

A 3. ábrán bemutatott, nyolc kiemelt közetmechanikai modellezési módszer önmagában, illetve bármely számkombinációval használható, vagy mint egy, a modellezés előfeltételeitől függő, egymást követő permutáció.

### 3 A KÖZETTESTBEN VALÓ TERVEZÉS ELJÁRÁSMÓDJA

#### 3.1 *A közettestben való tervezés legfrissebb folyamatábrája*

A közettestben való tervezéshez két folyamatábrát használunk. Az elsőt a 3. ábráján feltüntetett elemző eljárások összefoglaló táblázata mutatja be. Ezt összekapcsolhatjuk a 4. ábrán bemutatott újabb, közettestben történő tervezési eljárások folyamatábrájával. A 4. ábra azonban főként az elemző módszerekre és a kezdeti és végső tervezési munkára helyezi a hangsúlyt.

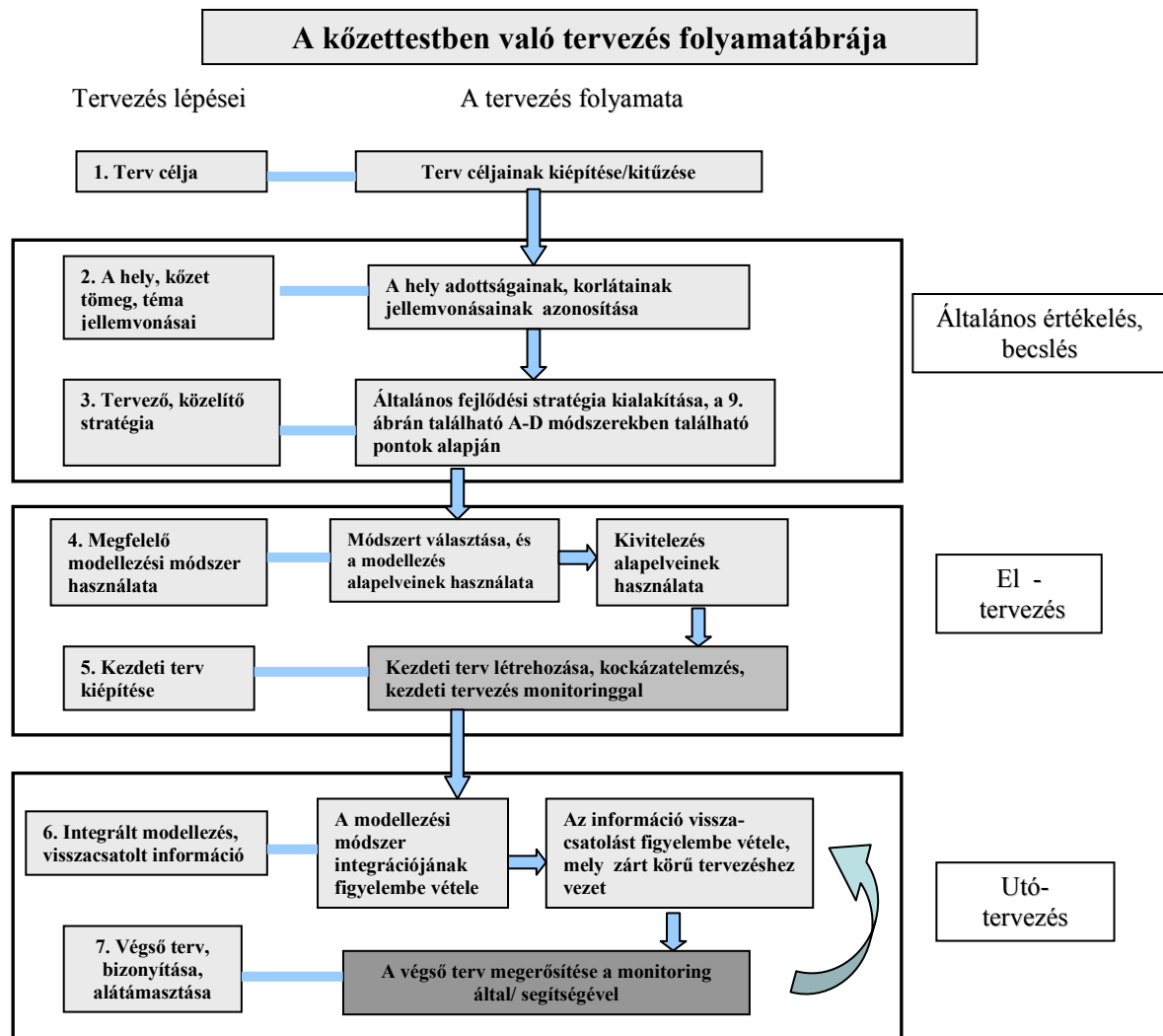
#### 3.2 *A közettestben való tervezési eljárás lépései*

A 4. ábra egyedi lépéseit az alábbiakban ismertetjük.

1. *Terv célja:* a tervezési célt a folyamatábra tetejére helyezhetjük. A célok, tervek magukba foglalják, hogy változatos közzet tulajdonságok, vizsgálatok szükségesek a különböző célú tervezések esetén. Ha nincs határozott elképzelés erről a munka megkezdése előtt, akkor a munka nem lehet jól szervezett.
2. *A projekt, a terület, a téma jellemvonásai:* a különböző szituációk, közzetömegek, projektek esetén más-más tervezési fázisok, lépések érvényesek. Ritkán találkozunk két azonos projekttel, tehát minden közettestben történő tervezés „különleges”, egyszeri esemény. Az alapelvek sokféle módon értelmezhetők.
3. *Tervezés közelítő stratégia:* Azonosítsuk a 2. pontban említett jellemzőket. A modell tervezési szemlélete ideiglenesen készül a 3. ábrán található modellezési módszerválasztás alapján. Számos aspektust figyelembe kell venni: érvényes készletet, a tervezésben esetlegesen

felmerülő hiba következményeit, a közzétömegben előforduló térbeli különbségeket, valamint vizsgálni kell az egyes hatásokat az idő függvényében is.

4. *Megfelelő modellezési módszer használata:* Ebben a lépésben választjuk ki a teljes szemléletmódot és megfelelő számítási eljárást. A megfelelő modell kiválasztása érdekében célszerű nyomon követni a cikkben feltüntetett alapelveket.
5. *Előzetes tervekészítés:* ez a lépés egyértelművé teszi az előzetes tervezést, így az építés elkezdődhet. Előre ismeretes, hogy mi nem alkothatja a végső terv részét, de ez a legjobb megoldás a monitoring eredmények és a háttéranalízis előtt.
6. *Integrált modell és információ visszacsatolás:* a monitoring eredmények közvetlen használatával ebben a lépésben váltunk a korábbi elemzésből utólagos elemzésekbe (lásd 3. ábra). A cél, hogy javítsuk fokozott a tervet/tervezést a háttéranalízis, monitoring adatok, modellezési módszerek, és a közet paraméterek egységes figyelembevételével. (Tehát fokozottan együtt kezeljük az egyes paramétereket, és együtt alkalmazzuk a modellre.) Más szóval a kezdeti tervezés teljes arányú kísérlet a végleges terv elkészítése céljából.
7. *Késői (utó-) tervezés, és bizonyítás:* Végezetül a megfigyelés (monitoring) folytatódik, a tervezéssel szemben felállított feltételek helyessége megerősítést nyer.



4. ábra A közzettestben való tervezés folyamatábrája

### 3.3 Projekt célja, megszorításai, a hely sajátos jellemvonásai, köztest és kutatás célja

A 4. ábra a köztestben való tervezési eljárási folyamatot mutatja be. Döntő fontosságú a projekt céljának, valamint a tervezésben, a korlátozó feltételek pontosítása - például a tervezési szempontok és a helyi paraméterek vizsgálata különbözik egy rövid távon fenntartandó bányászati fejtési, illetve fejtés-előkészítő térség és egy hosszú távú radioaktív hulladéktároló esetében.

A projekt célja természetesen befolyásolja a tervezést, mivel a különböző feltételek közvetlenül kapcsolódnak a célhoz. A magas nyomású víz-alagút esetében a döntő tervezési paraméter a minimum helyben levő főnyomás értéke. Egy vonatalagút esetében pedig a fő cél egy hosszú-távon is stabil, megfelelő funkcionalitású felszín alatti térség kialakítása elfogadható értékek illetve körülmények között.

Így a tervezést és a helyi paraméterek vizsgálatát nem lehet általánosságban rögzíteni, mivel mindegyik függ a projekt céljától és feltételektől. Ezért helyeztük a folyamatára tetejére és egyben elejére a projekt célját és a korlátozó feltételeket.

### 3.4 A tervezés megközelítési módjainak megalapozása a modellezési módszereken keresztül

Ahhoz, hogy a köztestben való tervezést megvalósítsuk, az szükséges, hogy megbecsüljük a különböző tervezési módok hatásait. Meg kell tehát „jóslunk” (becsülnünk), hogy mi fog történni, ha a közetszerkezetben egy meghatározott szerkezetet építünk az érintett köztömegre vonatkozóan. Ezért a tervezési mód teljes körű felbecsülésében és megalapozásában, a 3. ábrán bemutatott nyolc individuális módszer kombinációjának egyikét kell kiválasztani.

### 3.5 A kivitelezés szabályainak, és modellezés alapelveinek kihasználása

Ahhoz hogy eljussunk a 4. ábrán a modellezési stratégia alapján eldöntött kezdeti tervezéshez, fontos megvizsgálni, hogy a modellezés valóban tartalmazza-e a helyszín, a köztömeg és projekt megfelelő tulajdonságait. Ha például egy hosszú távú köztömeg eltávolítás a cél, akkor az elasztikus analízis nem megfelelő.

Ideális esetben létezik egy megalapozott eljárás, amellyel megbizonyosodhatunk arról, hogy a megfelelő modellt választottuk. Az 1. táblázatban bemutatunk 9 alapelvet, amelynek a helyes tervezés esetén teljesülnie kell. Ezek egyértelműen meghatározottak, de számos ok miatt lehetséges, hogy nem az összes tényezővel kapcsolatban lehetünk biztosak abban, hogy teljesülnek. A modellezés nem lehet elég hatékony abban az esetben, ha az alkalmazott adathalmaz hiányos.

<i>A modellezés alapelvei</i>	
1	Minden lényeges folyamatot (szerkezeti mechanizmus és gradiens) tartalmaznia kell az elemzésnek
2	Minden lényeges tulajdonságot, beleértve bármilyen változást, be kell építeni az elemzésbe
3	Az elemzés szükséges térbeli kiterjedését (tartományát) vegyük figyelembe a modell felépítésekor
4	Az esetlegesen előforduló ideiglenes hatásokat is vegyük számításba a modellezés során
5	Az alkalmazott számítógépes kódok a vizsgált problémára vonatkozó alkalmasságát ellenőrizni kell
6	Bármely alkalmazott kódnak tudnia kell kezelni a vizsgált folyamatot, valamint a modellezett a geometriai jellemzőkkel és a vizsgált időintervallummal összefüggésben kell lennie.
7	A kódba épített algoritmusnak alkalmasnak kell lennie a vizsgált probléma kezelésére
8	Az eredményeknek összhangban kell lenniük a tervezés céljával
9	A kódnak nem szabad figyelembe vennie a rosszul meghatározott, vagy szubjektív tulajdonságokat

**1. táblázat.** Javasolt modellezési alapelvek

Minden egyes számítógépes program alkalmazásánál a felhasználónak illene megbizonyosodnia (szükség esetén a szoftver fejlesztőjének megkeresése által), hogy a program által használt megoldási eljárás alkalmas-e az adott probléma megoldására (azaz a program „verifikálva” van-e). Erre vonatkozólag a 2. táblázat a további hét alapelvet ismertetünk.

<i>Numerikus megvalósítás alapelvei</i>	
1	A tervezés célját (pl. mi a célunk a modell felállításával) egyértelműen meg kell határozni a meghatározandó végeredményekkel együtt
2	Minden releváns eredménynek rendelkezésre kell állni a modellhez
3	Csak a valódinak tűnő értékeket szabad elfogadni
4	A modellezett területnek megfelelő nagyságúnak kell lennie, hogy pontos eredményt adjon a vizsgált problémára vonatkozóan
5	Abban az esetben, ha nem minden tervezési követelmény kielégíthető, akkor néhány becslés és feltételezés figyelembevételével az ebből jelentkező hibák nagyságát és minőségét előre meg kell becsülni
6	Ha a modellezés kielégítette a felállított követelményeket, az eredmények kiértékelésére egy szűrési, ellenőrzési feltételrendszert állítunk fel
7	Szükség esetén egy modellezési ajánlást is bevezethetünk a különböző számítógépes kódok kiválasztása és alkalmazhatósága alapján

## 2. táblázat. Numerikus megvalósítás alapelvei

A következő lépés a 4. ábra 5. lépése, amely szerint a kezdeti tervezés kiépített, a tervezés elkezdődhet. Előre látható, hogy későbbi megfigyelési információktól vissza kell térnünk a 4. ábra 6-7 lépésének végrehajtásához. Ha ez előre nem látható, akkor természetesen a kezdeti tervezés lesz a végleges tervezés, s törekedni kell arra, hogy ez megfelelően hajtsuk végre.

### 3.6 A tervezés ellenőrzése, felépítése

A 4. ábra 6-7 lépése mutatja a módosított tervezést, melyben a modellezési eljárások javított egységével együtt ellenőrző vizsgálatot alkalmazunk. Számos iteráció előfordulhat a közzétömetgtől, a közet változatosságtól, komplexitástól függően.


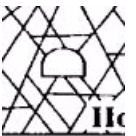
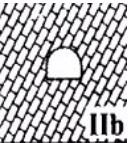
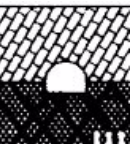

## 4 KÖZZETTESTBEN TÖRTÉNŐ NUMERIKUS MODELLEZÉSI MÓDSZER MEGVÁLASZTÁSA

Ebben a fejezetben rövid leírást adunk a különböző numerikus eljárásokról. A numerikus módszerek egy adott probléma a tér- és időtartomány diszkrét pontjaira vonatkozó megoldására alkalmasak. Ezek a módszerek két nagy csoportba sorolhatók: a véges differenciák módszerébe és az integrálkifejezésre vezető módszerébe.

A numerikus módszerek jellemzője, hogy a modell részletességét a közelítő megoldás pontossági igénye határozza meg. Ezeknél a modelleknél a vizsgált mennyiségeket tartalmazó parciális differenciálegyenletek helyett algebrai egyenletrendszert állítunk fel az állapotváltozók diszkrét tér- és időbeli pontokon érvényes értékeire. A megoldandó egyenletek nagy száma miatt a modellezett probléma megoldása minden esetben számítógép alkalmazását követeli.

A 3. táblázat a különböző állapotú közetkörnyezetben alkalmazható numerikus módszereket ismerteti a közzettestek tönkremeneteli állapota alapján Tzamos és Sofianos (2007) publikációját figyelembe véve.

Az alábbiakban néhány mondat erejéig bemutatjuk ezen numerikus eljárásokat. Ezt az összeállítást az interneten fellelhető program bemutatók alapján, valamint Bagi Katalin BME építőmérnöki Karán leadott jegyzete alapján állítottuk össze.

Kőzetkörnyezet leírása (az adott osztályok nem közvetest osztályok)		Tönkremenetel	Tervezés	Tagoltsági rendszerek	Kőzetosztály a Q értéke alapján	Tagoltságok távolsága	Fesztáv / tagoltságok távolsága
<b>Ép-tömör</b> Különösen tömör kőzetkörnyezet, nagy nyomószilárdság, ritkán tagolt, erős kitöltöttség		Ép kőzet tönkremenetel, különálló blokkok elcsúszása	Véges elemek módszer (FEM), perem- elem módszer (BEM)		100-1000	> 2 m	<<5
<b>Ép – tagolt</b> Tömör, kissé tagolt, közepes kitöltöttség		Néhány blokk elcsúszása	Véges elemek módszer (FEM), perem- elem módszer (BEM)	1-3	10-100	0,5-2 m	5-20
<b>Közepes – erősen tagolt</b> Mállott, szabálytalan töredezettség, közepes kitöltöttség		Több blokk elcsúszása	Diszkrét elemek módszere (DEM) pl. UDEC/3DEC, DDA	2-4	1-10	10-50 cm	20-100
<b>Mérsékelten töredezett – erősen tagolt</b> Mállott, gyenge kőzetkörnyezet, kis mértékű kitöltöttség		Elforduló nyírás	Diszkrét elemek módszere (DEM) pl. UDEC/3DEC, DDA	>4	0,1-1	5-10 cm	100-500
<b>Erősen (tektonikusan) töredezett</b> Nagyon gyenge, töredezett kőzetkörnyezet, agyag jelenléte, kitöltöttség nincs(tönkrement zóna)		Gyenge nyírási zónák, agyag jelenléte	Véges elemek módszere (FEM), véges differenciál módszer (FDM) pl. FLAC		<0,1	< 5cm	>>500

**1. táblázat.** Numerikus módszerek alkalmazása különböző állapotú kőzetkörnyezetben (Tzamos és Sofianos 2007 alapján)



#### 4.1 Végés differenciál módszer (Finite Difference Method - FDM)

A módszer a parciális differenciálegyenletek numerikus megoldásának egyik legrégebbi módszere. Lényege, hogy a folytonos teret diszkrét pontok rendezett halmazával helyettesítjük. A teret a térbeli koordináta-rendszer három tengelyének irányába eső, párhuzamos egyenesekkel behálózuk. Az ily módon definiált háló rácspontjaival fedjük le a folytonos teret. A módszer előnye, hogy könnyen kezelhető, megbízható, azonban az egyenes vonalak alkalmazása nem teszi lehetővé a bonyolultabb formák peremének követését, valamint egyenlőtlen osztásközű háló alkalmazása esetén az elemek alakja jelentősen eltérhet az ideálisnak feltételezett izometrikustól. A különböző irányokban eltérő értékű paraméterekkel kezelése nehézkes, ha az nem esik egybe a főirányokkal. A megoldást nagy mértékben befolyásolja diszkretizáció során felvett pontok száma is. Hirtelen hálóméret változás, illetve az eltorzult alakzatok szintén csökkenthetik a pontosságot. Ez a módszer strukturált, egységes, általában négyszög (2D-s) háló esetén alkalmazható megfelelő biztonsággal.

#### 4.2 Integrál módszerek

Az integrál módszerek a végés differencia módszer hátrányait kiküszöbölik, amelyeknek lényege, hogy a vizsgált tartományra (a peremeket is beleértve) vonatkozó integrálok jelennek meg. Ezen módszereken belül megkülönböztetjük a peremelem módszert, valamint a végeselemes módszert (belső diszkretizációs módszer) és változatait.

##### 4.2.1 Peremelem módszer (Boundary Element Method - BEM)

A módszer lényege, hogy a végeselemes módszerek alap gondolatát használják, azonban kizárólag a vizsgált közeg vagy szerkezet peremén, megfelelő sűrűséggel felvett pontok halmazából adódó matematikai egyenletrendszerből nyeri a vizsgált feladat megoldását. A pontokat összekötő rács szabálytalan alakú, azonban a szomszédos elemek élének és csomópontjainak illeszkedniük kell. A peremelemes módszereknél olyan közelítő függvényeket használunk, melyek a vizsgált tartományra vonatkozó differenciálegyenleteket kielégítik, a peremfeltételeket viszont nem (a végeselemes módszereknél a tartományon értelmezett közelítő függvények részben vagy pontosan kielégítik a peremfeltételeket). A módszer előnye, hogy az input adatok száma jóval kisebb, mint a véges elemes módszereknél. További előny, hogy kevesebb paraméter használata is megfelelő pontosságot eredményez, illetve a végtelen kiterjedésű tartományok esetén durva korlátozások nélküli analitikus közelítés lehetséges. A hátrányai azonban, hogy a megoldandó algebrai egyenletrendszer mátrixában nincsenek egyszerűsítések, tehát az egyenletrendszer megoldása nehezebb.

##### 4.2.2 Végeselem módszer (Finite Element Method – FEM)

A véges elemek módszerének lényege, hogy a vizsgált szerkezetet, ill. anyagot amelyet kontinuumnak tekintünk, és a szerkezet alakját kellő pontossággal követő, véges számú elemekre bontjuk. Az elemek nem folytonosan, csak sarokpontjaikon kapcsolódnak. A közelítő megoldást a vizsgált tartomány elemein folytonos, egyszerűen kezelhető függvények formájában keressük. Minden elemre határozott integrálokat kapunk, melyek algebrai összegzése adja az ismeretlenek meghatározására alkalmas egyenletrendszert. A módszer előnye, hogy egyszerű alapelvek alkalmazásával összetett probléma elemzésére is alkalmas. Az elemek mérete és alakja változtatható, a véges elemek módszere a bonyolult forma problematikáját tudja kezelni, ezért széles körben alkalmazható eljárásá vált. A módszer hátránya azonban, hogy a megoldandó egyenletrendszer mátrixa összetettebb, mint a végés differencia módszerek esetén, amely növeli a számítás idejét, illetve a számítógép kapacitásának szükségességét. További hátrányt jelent hogy a közelítés hibájának nagyságrendje nem becsülhető meg.

##### 4.2.3 Diszkrét elemek módszere (Discrete Element Method - DEM)

A diszkrét elemek módszere a véges elemes módszer egy változata. A többi módszerektől eltérően, ahol az elemek csomópontjaiban folytonossági követelmények teljesülnek, a diszkrét elemes eljárások esetében egymástól független, önálló elmozdulási szabadságfokokkal

rendelkező, önállóan deformálódni is képes elemek alkotják a modellt. A módszer alkalmazása akkor előnyös, ha a modellezni kívánt anyag jellegzetes belső szerkezettel rendelkezik, amely a mechanikai viselkedést lényegesen befolyásolja és a külső hatásokra maga is változásokkal reagál. A szokásos kontinuum-mechanikai alapú mérnöki számítási eljárások ezeket a jellegzetességeket vagy egyáltalán nem, vagy csak igen nehezen tudják modellezni. A diszkrét elemek módszerével vizsgálható pl. a töredezett sziklatalajokban tervezett építmények mechanikai viselkedése. További előny ennél a módszernél, hogy nem csak az elemek közötti kapcsolat megszűnése, hanem a kapcsolatok létrejötte is modellezhető. A különböző diszkrét módszereken alapuló szövegek a legkülönbözőbb alakú elemeket alkalmazzák. A módszerek eredménye függ a definiált geometriai jellemzőktől, és az elemek és a kapcsolatok mechanikai anyagjellemzőitől.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Bieniawski ZT 1989. *Rock mechanics design in mining and tunneling*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Bieniawski ZT 1993. *Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends*. In: Hudson JA, editor. *Comprehensive rock engineering*, 3. 553 –73.
- Brady BHG, Brown ET. 1985. *Rock mechanics for underground mining*. London: George Allen & Unwin; 527.
- Burland J. 2007. Tercaghi: Back to the future. *Bull. Engng. Geol. Env.* **66**(1): 29-33.
- Hoek E, Brown ET 1977. *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, Elsevier Applied Science; 527.
- [http://meshining.com/index\\_elemei/ujs-3-7.pdf](http://meshining.com/index_elemei/ujs-3-7.pdf)
- <http://www.epito.bme.hu/me/dolgozok/feltoltesek/kbagi/demkivonat1ea.pdf>
- <http://www.mkk.szie.hu/~hgkov/opusza/opusza3.pdf>
- Hudson J.A., Feng X.T. 2006 Updated flowcharts for rock mechanics modelling and rock engineer design. ScienceDirect
- Hudson JA 1993. *Rock properties, testing methods and site characterization*. In: *Comprehensive rock engineering*, 3. 1–40.
- Knill J. 2003. Core values: the first Hans-Cloos lecture. *Bull. Engng. Geol. Env.* **62**(1): 1-34.
- Li S, Wu X, Ma F 1998. Application of Precedent Type Analysis (PTA) in the construction of Ertan Hydro-electric Station, China. *Int J Rock Mech. Min Sci.* **35**(6):787–95.
- Morgenstern NR 2000. *Common Ground*. Proc. Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Technomic, **1**: 1–30.
- Pahl G, Beitz W. 1984. *Engineering design*. Berlin: Springer.
- Tzamos S, Sofianos AI 2007. A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **44**(4): 477-495